

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.024

# 同步发电机励磁系统参数辨识与校核工具开发

乔冠伦<sup>1</sup>, 李梧桐<sup>1</sup>, 李福兴<sup>2</sup>, 沈小军<sup>1\*</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 国网上海市电力公司 电力科学研究院, 上海 200437)

**摘要:**针对同步发电机励磁系统缺乏友好、便捷的可视化参数辨识和校核工具的问题,基于 Matlab/GUI 开发平台,依据同步发电机励磁系统建模导则设计开发了一种同步发电机励磁系统参数辨识与校核可视化工具,给出了可视化工具的功能需求和架构设计,描述了工具包含的励磁系统模型搭建模块、参数辨识模块、参数校核模块和结果输出模块的实现方法及其功能特点,并利用某发电机励磁系统实测数据对开发的工具进行了测试。测试结果表明:通过模块化和局部化将复杂的程序操作和计算过程封装简化为少量关键参数的输入与调整,可有效降低操作繁杂度,参数自动辨识算法及专家经验规则化,可保障自动辨识结果的精度,降低对人员技能经验的依赖,开发的可视化工具可减少 40% 的操作量。

**关键词:**同步发电机;励磁系统;参数辨识;仿真校核;可视化工具

中图分类号:TP311.56

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1348-06

## Tool development for parameter identification and verification of excitation system of synchronous generator

QIAO Guan-lun<sup>1</sup>, LI Wu-tong<sup>1</sup>, LI Fu-xing<sup>2</sup>, SHEN Xiao-jun<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of friendly and convenient visualization tool for parameter identification and verification of excitation system of synchronous generator, based on Matlab/GUI development platform and modeling guide for excitation system of synchronous generator, a visualization tool for parameter identification and verification of excitation system of synchronous generator was designed, the functional requirement and architecture design of the visualization tool was provided, the realization method and feature of the tool including excitation system modeling module was described, parameter identification module, parameter verification module and result output module, and accomplished the test of the tool by making use of the measured generator excitation system data. The test results indicate that the complex operating procedures and calculation processes can be packaged and simplified to the input and adjustment of key parameters through modularization and localization, which can effectively reduce the complexity of the operation. Automatic identification algorithm and regularization of the expert experience can guarantee the accuracy of automatic identification results and reduce the dependence on staff skills and experience. The visualization tool developed can reduce the amount of operation by 40%.

**Key words:** synchronous generator; excitation system; parameter identification simulation and verification; visualization tool

收稿日期:2017-02-21

作者简介:乔冠伦(1992-),男,河南郑州人,硕士研究生,主要从事励磁系统状态评估技术方面的研究。E-mail: mrguanlun@163.com

通信联系人:沈小军,男,博士,副教授。E-mail: xjshen79@163.com

0 引言

同步发电机励磁系统对于电力系统的电压控制与稳定运行起着十分重要的作用<sup>[1-4]</sup>,对同步发电机励磁系统进行准确的参数辨识和仿真校核是电力系统安全稳定分析计算的重要环节<sup>[5-9]</sup>。

同步发电机励磁系统的参数辨识与仿真校核的基本思路是依据《DL/T 1167-2012 同步发电机励磁系统建模导则》(以下简称《导则》),构建励磁系统仿真模型,然后利用参数辨识算法对同步发电机励磁系统模型进行参数辨识,在保证辨识结果满足《导则》规定误差的基础上,通过系统性能评估进一步验证参数辨识结果的工程可用性<sup>[10]</sup>。实际工作经验表明:同步发电机励磁系统模型种类繁多,系统参数辨识过程较为复杂,从熟悉原理至工程应用的周期较长,新技术人员较难独立工作,对专家经验依赖性较强;另外,励磁系统参数辨识与校核过程缺乏操作便捷的工具,存在数据处理效率低、任务繁重、技术人员短缺等问题<sup>[11-14]</sup>。

鉴于此,本研究将根据工程需求,基于《导则》规定的标准模型及标准试验方法,以 Matlab/GUI 为平台,设计开发同步发电机励磁系统参数辨识与仿真校核可视化工具。

1 软件功能需求分析与架构设计

1.1 需求分析

同步发电机励磁系统参数辨识与校核可视化工具应具备以下功能特点:(1)封装复杂的程序操作和计算过程,通过数据底层交换,降低入门技术门槛和技术经验的依赖性;(2)模块化设计,预留出软件接口;(3)局部化设计,将关系密切的软件元素布局在同一模块内;(4)具备输入参数和辨识图像的同步调整功能,半自动的参数辨识与校核操作降低数据处理的繁杂度;(5)具备辨识结果误差定量分析和可视化展示功能,辅助系统参数的校核评估;(6)具备人机交互界面,以界面形式展示系统内部各环节参数处理过程。

1.2 架构设计

软件采用模块化设计,以同步发电机励磁系统参数辨识与仿真校核的工作流程作为设计对象,将软件划分为同步发电机励磁系统模型搭建模块、系统参数辨识模块、系统参数校核模块和结果输出模块。软件架构如图 1 所示。

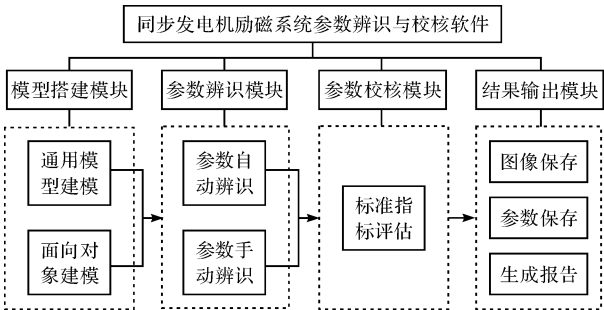


图 1 可视化工具架构示意图

2 可视化工具设计与实现

本研究基于 Matlab 开展励磁系统参数辨识与校核评估工具的研制<sup>[15]</sup>。

2.1 励磁系统模型搭建模块

该模块利用 Matlab 语言的条件分支结构语句将励磁系统建模分为通用模型建模和面向对象建模两类方法,为方便励磁系统模型的归类、选择和添加,两类方法的励磁系统仿真和参数辨识程序均以模型为单位保存,并利用 GUI 的 panel 组件分类设计两种系统建模面板。其中,通用模型建模面板包含中国电机工程学会励磁工作组推荐的 FM-FV 共 10 种励磁系统模型,通过采用高阶传递函数配合可变的类型选择变量,按照不同的仿真精度需求对实际励磁系统模型进行简化处理,实现了同一个模型可仿真模拟多种励磁系统<sup>[16-18]</sup>。为简化通用模型的查询与选择过程,该面板利用 GUI 的 popupmenu 组件对各类励磁系统模型进行封装隔离。

另外,该软件采用 open\_system 函数直接调取系统仿真模型,并利用 GUI 的 press button 组件对系统模型的参数修改和模型保存程序进行封装隔离。以旋转励磁系统通用模型为例,软件利用 press button 组件选择查看旋转励磁系统模型,界面自动弹出对应的 Simulink 模型框图,并直接利用该模型框图进行参数修改与保存,旋转励磁系统通用模型如图 2 所示。

相比通用模型建模,面向对象的个性化建模更符合机组的实际情况,在参数考核不合格时可以更有针对性地调整励磁系统参数。该工具面向对象建模面板包含励磁系统基础模型,模型各环节参数可根据实际励磁系统性能需求进行个性化设计。其中,励磁系统模型选择功能利用 Matlab 的 uigetfile 函数调用软件模型数据库中的已有模型,其来源是 BPA 标准模型库或者已经建模完成的励磁系统模型库;励磁系统模型新建功能可根据实际需求对励磁系统模型进行个性化搭建,并将搭建好的模型保存至模型数据库中。

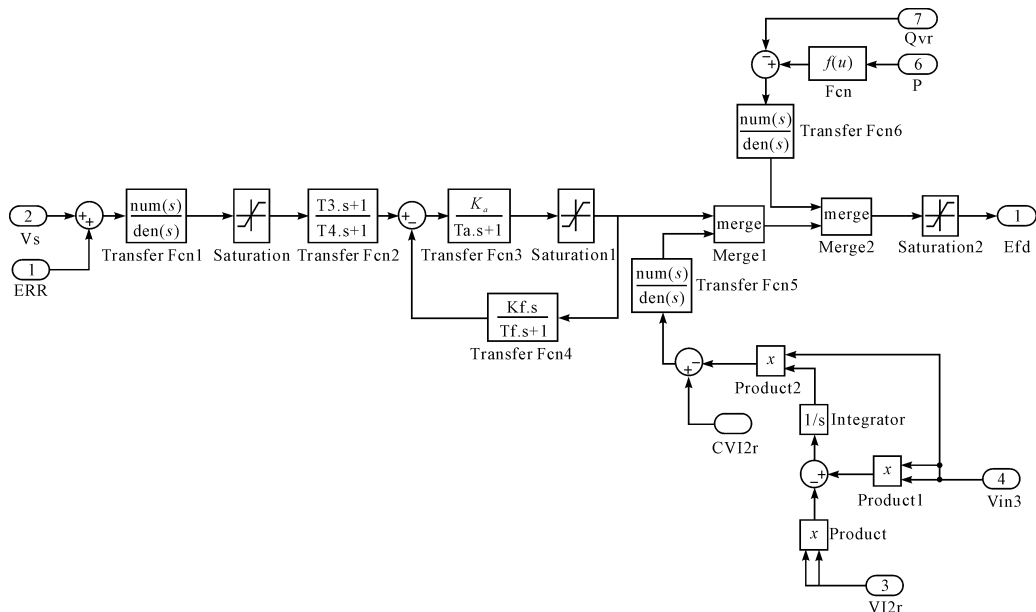


图2 励磁系统通用模型框图

为提升可视化工具操作的便捷性与友好性,各环节的功能程序均采用 GUI 的 press button 组件进行封装隔离。以系统模型新建功能为例,点击该面板中的新建模型按钮,界面自动弹出同步发电机励磁系统结构框图,系统基于同步发电机励磁系统标准模型框图,通过点击各环节按钮调用对应的 Simulink 模型,对系统各环节进行个性化设计,如图 3 所示。

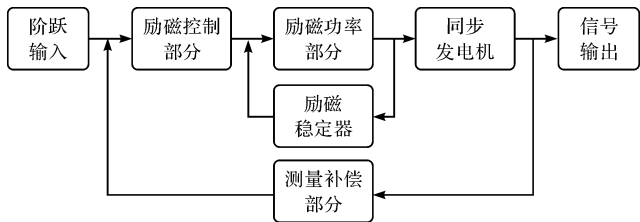


图3 励磁系统标准模型框图

为方便励磁系统参数查询与修改,系统标准 Simulink 模型的结构与标准模型框图的界面布局完全一致,励磁系统标准 Simulink 模型如图 4 所示。

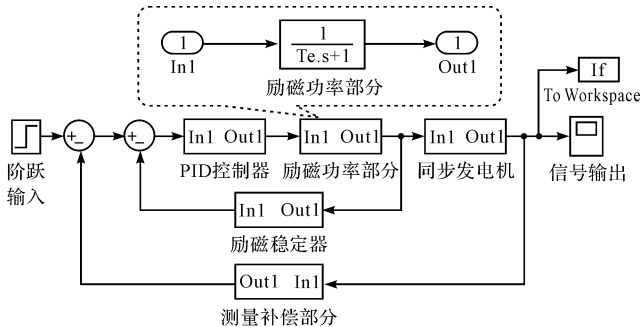


图4 励磁系统标准 Simulink 模型

模型中修改模型结构与参数,如图 4 的励磁功率部分所示。

2.2 励磁系统参数辨识模块

相关参数主要通过现场实测数据进行测取辨识,首先将原始数据和仿真模型导入励磁系统参数辨识模块,然后在励磁系统参数自动辨识和手动辨识的过程中同步调节仿真实测对比曲线,不断减小仿真值与实测值间的偏差值,从定性、定量两方面综合选择出满足实际工程要求且拟合度最高的仿真值。

实际操作中,当选定的参数调整到符合标准规定的误差时,即认为该组参数已能代表机组的实际参数,但该组参数可能只是解集簇中的一个解,不一定是最优解。鉴于此,该模块在实现《导则》标准计算的基础上,建立了基于权重阈值的励磁系统模型参数辨识寻优策略<sup>[19]</sup>:以上升时间、峰值时间、超调量 3 项误差指标的标幺值作为计算对象。针对电力系统各类运行工况差异化的调节要求,若某一性能误差指标在当前运行工况下更为重要,则指定该指标作为优先指标,通过数学计算得到最优解约束条件,然后在符合导则约束的解集簇中利用最小二乘法实现励磁系统参数自动寻优,获取励磁系统模型参数辨识工程最优解<sup>[20]</sup>。

首先设励磁系统模型真实参数为  $\theta_R$ ,励磁系统模型仿真参数为  $\theta_I$ ,各项评估指标的仿真值与真实值之间的误差为  $\varepsilon_i$ ,其中,  $i = 1, 2, 3$  分别代表上升时间、峰值时间、超调量。每一组  $\theta_I$  均可计算得到相对应的  $\varepsilon_i$ ,即  $\varepsilon_i$  是  $\theta_I$  的函数。以励磁功率部分为例:

$$\varepsilon_i = F(\theta_I)$$

(1)

点击其中某一模块,即可在弹出对应的 Simulink

应用《导则》中的标么化规则计算各项误差指标的标么值  $\varepsilon_i^*$ ,  $\varepsilon_i^*$  首先应该满足《导则》标准规定的允许范围。基于标么化规则的励磁系统性能误差指标应满足:

$$\varepsilon_i^* \in [0,1]$$

(2)

然后在符合《导则》约束的解集中进行寻优操作。设定各项指标的优先权重为  $W_i$ , 其中,  $i = 1, 2, 3$  分别代表上升时间、峰值时间、超调量。  $W_i$  值位于 0 和 1 之间, 且  $W_i$  值越大, 代表该项指标具有越高的优先级。根据加权的相关理论, 3 项  $W_i$  值的和为 1。计算误差指标的标么化加权均值  $\varepsilon_w^*$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_w^* = \sum \varepsilon_i^* \cdot W_i \\ 0 \leq W_i \leq 1 \\ \sum W_i = 1 \end{cases}$$

(3)

以上述方程作为最优解判定函数, 寻找判定函数达到最小值  $\varepsilon_{wmin}^*$  时的系统模型参数  $\theta_{opt}$ :

$$\begin{cases} \varepsilon_{wmin}^* = \min(\varepsilon_w^*) \\ \theta_{opt} = F^{-1}(\varepsilon_{wmin}^*) \end{cases}$$

(4)

此时得到的仿真参数  $\theta_{opt}$  最接近实际参数  $\theta_R$ , 即为相应优先级权重下的最优解。

将现场实测数据整体导入励磁系统参数辨识模块的过程中, 励磁系统参数辨识模块通过高级文件 O/I 操作执行状态变量的初始数据的赋值和读取, 并采用 txt 文件读写模式实现 Matlab 工作空间和磁盘文件间的数据传递。该模块利用 GUI 的 text 组件将原始数据的数据交换程序封装隔离, 对外显示为原始数据的填写确定。同时, 通过 Matlab 全局变量 global 函数将所有的原始数据定义为全局变量, 以便于跨界面、跨模块调用原始数据。

导入试验数据后, 对励磁系统各环节进行参数自动辨识。励磁系统参数辨识模块的参数自动辨识结果由特定算法计算得到, 程序利用 Matlab 局部变量函数对部分关键参数的计算过程与结果进行了解耦。在励磁系统仿真实测对比曲线观察阶段, 参数辨识模块利用 GUI 的二维绘图函数提取出励磁系统参数仿真实测曲线, 并在同一个界面内集中展示。理论分析表明: 单纯通过观察仿真实测曲线偏差度进行参数选择有着一定的局限性, 该软件基于《导则》规定的标准计算流程, 对参数选择方法做出了改进, 设置了励磁系统的两类性能量化指标: 系统实际性能指标和系统仿真性能指标。

励磁系统参数自动辨识是软件自动进行的数学计算过程, 其计算结果为数学上的最优解而非工程上的最

优解。实际工程经验表明: 数学上的最优解的取值有可能超出实际工程取值范围或是在工程中难以取到, 因而需要在此基础上进行进一步的手动调节<sup>[21-23]</sup>。在系统参数手动辨识过程中, 程序利用 GUI 的 slider 组件对所有基于工程经验的参数取值程序进行了封装简化, 对外显示为具有固定步长、固定阈值的参数选取窗口, 参数选取步长和阈值的设定均参考实际工程数据处理信息。另外, 软件通过 GUI 的 edit 组件对参数值进行手动修改, 并利用 MATLAB 的 assignin 函数和 sim 函数实现了系统仿真图像伴随参数的同步调整, 将系统参数实时传送给系统模型进行参数辨识试验, 然后通过界面同步展示仿真实测对比曲线图像。

2.3 励磁系统参数校核评估模块

该模块利用励磁系统参数辨识结果对励磁系统进行仿真校核, 计算出励磁系统上升时间、超调量、调节时间等各项系统性能指标, 并与《导则》标准指标进行对比, 判断励磁系统性能是否合格。

该模块利用 GUI 的 text 组件和 press button 组件将各项励磁系统性能指标评估程序进行封装隔离, 并将《导则》规定的系统性能评估范围标定在本模块界面上。

2.4 结果输出模块

其主要功能是将撰写报告所需的参数结果及波形图像存入 Word 文档中。程序设计采用 Word 文件读写模式控制 Matlab 工作空间和磁盘文件间的输出结果传递。输出文件包含同步发电机励磁系统的关键参数辨识结果和仿真实测对比曲线。

3 可视化工具有效性验证

本研究以某发电厂发电机组实测数据为例。试验机组采用的是 Alstom 励磁控制器, 励磁方式为两机交流无刷励磁。在励磁系统模型搭建模块中进行面向对象的个性化建模, 构建该发电机励磁系统模型, 如图 5 所示。

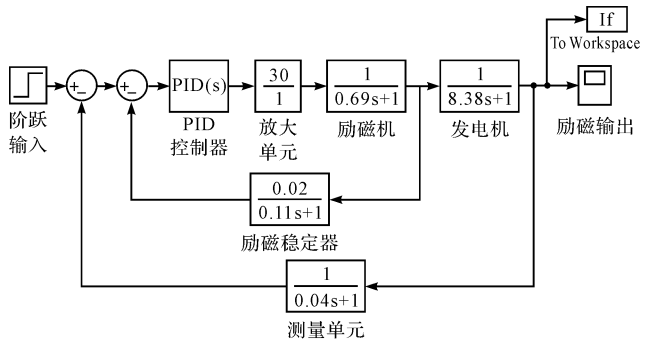


图 5 某发电机励磁系统模型

利用系统参数自动辨识法对系统各环节参数进行仿真辨识,再通过标准化评估功能判断励磁系统性能指标是否满足《导则》要求。设定参数与辨识结果如图 6 所示。

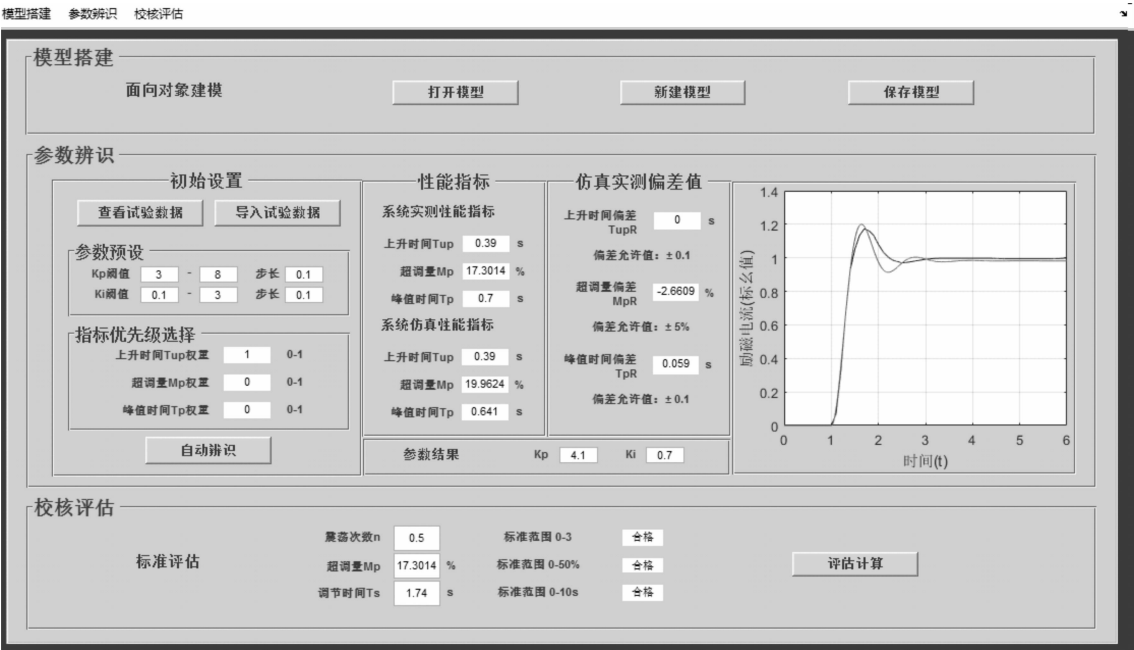


图 6 励磁系统参数辨识与校核可视化工具界面

试验中,让具有丰富经验的技术人员使用传统的非可视化命令输入式同步发电机励磁系统参数辨识与校核程序,让基本掌握参数辨识与校核、流程的技术人员操作研制的可视化工具,并记录操作时长和励磁系统仿真实测偏差值。

励磁系统参数辨识与校核结果如表 1 所示。

表 1 励磁系统参数辨识结果汇总表

| 参数分类     | 参数名称                  | 符号       | 辨识结果      |
|----------|-----------------------|----------|-----------|
| 参数辨识结果   | PID 控制器模块<br>比例放大环节倍数 | $K_p$    | 4.1       |
|          | PID 控制器模块<br>积分放大环节倍数 | $K_i$    | 0.7       |
|          | 上升时间偏差值               | $T_{up}$ | 0 s       |
|          | 超调量偏差值                | $M_p$    | -2.660 9% |
| 仿真实测偏差值  | 峰值时间偏差值               | $T_p$    | 0.059 s   |
|          | 震荡次数                  | $n$      | 0.5       |
|          | 超调量                   | $VM_p$   | 17.301 4% |
| 参数校核评估结果 | 调节时间                  | $T_s$    | 1.74 s    |

试验结果表明:研制的工具可准确实现模型参数辨识与校核,满足《导则》规定的误差要求,与资深专家采用传统的辨识工具得到的结果等同。工具测试过

程及结果还表明:通过将所有复杂的程序操作和计算过程封装简化为少量关键参数的输入与调整,并将专家经验数据信息标定在固定阈值内,在确保辨识结果精度的同时,对降低了入门技术门槛和人员技能经验的影响是可行的,可减少 40% 的操作量。

4 结束语

本研究基于 Matlab/GUI 开发平台,设计开发了同步发电机励磁系统参数辨识与校核可视化工具,该工具由励磁系统模型搭建模块、参数辨识模块、参数校核模块和结果输出模块等组成。案例应用结果表明,研制的可视化工具功能模块设计合理,参数辨识结果准确,操作便捷友好,可有效提高同步发电机励磁系统的参数辨识与校核工作效率,降低人员技能经验的影响。

参考文献(References):

[1] PLATERO C A, REDONDO M, BLAÁZQUEZ F, et al. High-speed de-excitation system for brushless synchronous machines[J]. **Electric Power Applications**,2012,6(3): 156-161.

[2] 贺仁睦,沈 峰,韩 冬,等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术,2007,31(14):62-67.

[3] 何 俊,黄文涛,陈 乔,等. 励磁系统关键参数对发电机组暂态特性的影响研究[J]. 湖北电力,2015,39(12):

- 56-59.
- [4] CHEN Z, LU J, MAO C, et al. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability[J]. **Industry Applications Society Meeting**, 2015, 52(4):1-10.
- [5] 贾旭东,李庚银,赵成勇,等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19):51-57.
- [6] 滕苏邨,张文朝,顾雪平,等. 电力系统动态仿真准确度综合评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8):54-59.
- [7] MOGHADDAM I N, SALAMI Z, EASTER L. Sensitivity analysis of an excitation system in order to simplify and validate dynamic model utilizing plant test data[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2015, 51(4):3435-3441.
- [8] 董久晨,王西田,刘明行,等. 自并励静止励磁系统精细建模及仿真[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5):112-115.
- [9] MA R, LIU Z, LIU J, et al. Analysis method on parameter identifiability for excitation system model of generator[J]. **International Conference on Power System Technology**, 2014, 42(22):767-774.
- [10] DL/T 1167-2012. 同步发电机励磁系统建模导则[S]. 北京:中国标准出版社, 2012.
- [11] 马 钊,安 婷,尚宇炜. 国内外配电前沿技术动态及发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6):1552-1667.
- [12] SAAVEDRA M A J, RAMIREZ S J M, MALIK O P. Methodology to estimate parameters of an excitation system based on experimental conditions[J]. **Electric Power Systems Research**, 2011, 81(1):170-176.
- [13] NAITALI A, GIRI F. Persistent excitation by deterministic signals for subspace parametric identification of MISO hamerstein system[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2016, 61(1):258-263.
- [14] JONAITIS A, DAUNORAS J. Identification of dynamic model of synchronous generator high frequency excitation system[J]. **Electronics and Electrical Engineering**, 2015, 107(1):25-28.
- [15] 张建新,郭 强,方 扬. 汽轮机调速系统建模仿真程序设计[J]. 华东电力, 2014, 42(12):7-11.
- [16] 卫 鹏,徐 珂,周 前,等. 基于 BPA 的励磁系统建模[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(8):6-11.
- [17] 万 黎,周鲲鹏,何 俊. 大型同步发电机组励磁系统的 PSASP 建模及仿真[J]. 湖北电力, 2016, 40(3):61-66.
- [18] IEEE Working Group. IEEE 421.5 recommended practice for excitation system models for power system stability studies[C]. San Francisco: IEEE, 2005.
- [19] SHEN Xiao-jun, LI Wu-tong, LI Fu-xing, et al. Parameter identification of synchronous generator excitation system model based on priority weight optimization[C]. **New York: IEEE**, 2005.
- [20] 沈 峰,贺仁睦,王君亮,等. 基于非线性直接优化方法的发电机励磁系统参数辨识[J]. 电网技术, 2007, 31(8):73-77.
- [21] 李 京,李 鹏. 励磁系统模型参数辨识中智能建模与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(10):304-307.
- [22] 刘振军,杨迪雄. 面向工程全局优化的混沌优化算法研究进展[J]. 计算力学学报, 2016, 33(3):269-286.
- [23] PAJUELO E, GOKARAJU R, SACHDEV M S. Identification of generator loss-of-excitation from power-swing conditions using a fast pattern classification method[J]. **IEEE Generation Transmission & Distribution**, 2013, 7(7):24-36.

[编辑:周昱晨]

## 本文引用格式:

乔冠伦,李梧桐,李福兴,等. 同步发电机励磁系统参数辨识与校核工具开发[J]. 机电工程, 2017, 34(11):1348-1353.

QIAO Guan-lun, LI Wu-tong, LI Fu-xing, et al. Tool development for parameter identification and verification of excitation system of synchronous generator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(11):1348-1353.《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>